

RAPPORT LNR 4112-99

Vurdering av tiltak for å sikre vannkvalitet etter utbygging av E 18 i senketunnel gjennom Bjørvika og Bispevika

Hovedkontor

Postboks 173, Kjelsås
0411 Oslo
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 22 18 52 00
Internet: www.niva.no

Sørlandsavdelingen

Televeien 3
4870 Grimstad
Telefon (47) 37 29 50 55
Telefax (47) 37 04 45 13

Østlandsavdelingen

Sandvikaveien 41
2312 Ottestad
Telefon (47) 62 57 64 00
Telefax (47) 62 57 66 53

Vestlandsavdelingen

Nordnesboder 5
5008 Bergen
Telefon (47) 55 30 22 50
Telefax (47) 55 30 22 51

Akvaplan-NIVA A/S

9015 Tromsø
Telefon (47) 77 68 52 80
Telefax (47) 77 68 05 09

Tittel Vurdering av tiltak for å sikre vannkvalitet etter utbygging av E18 i senketunnel gjennom Bjørvika og Bispevika.	Løpenr. (for bestilling) LNR 4112-99	Dato 25.10.99
	Prosjektnr. Undernr. O-99060	Sider Pris 32
Forfatter(e): Morten Schaanning, Birger Bjerkeng, Lars Golmen, Jan Magnusson og Arild Sundfjord	Fagområde 32	Distribusjon Åpen
	Geografisk område Oslo	Trykket NIVA

Oppdragsgiver(e) Aas Jakobsen A/S	Oppdragsreferanse Snorre Slappgård
---	--

Sammendrag

En senketunnel gjennom Bjørvika og Bispevika vil redusere vannutskiftingen i områdene innenfor. Dårligere vannutskifting kan resultere i oksygenmangel og episodisk fiskedød. Målsettingen med dette arbeidet har vært å vurdere eksisterende planforslag og mulige tiltak for å sikre tilstrekkelig vannkvalitet etter utbygging. Vannutskiftingen vil først og fremst begrenses av skipsstøtvollene som skal anlegges på utsiden av tunnelen. Rapporten skisserer aktuelle tiltak som oppfylling og heving av sjøbunnen innenfor skipsstøtvollene, lavest mulig overhøyde mellom tunneltak og sjøbunn, vannutskifting gjennom skipsstøtvollene via kanaler, rør og permeable masser og nedpumping av ferskvann gjennom diffusorer ved bunnen. Vurderingene er basert på hydrografiske observasjoner utført i Bjørvika sommeren 1999.

Fire norske emneord 1. vannutskifting 2. terskelfjord 3. oksygenmangel 4. hydrografi	Fire engelske emneord 1. water renewal 2. sill fjord 3. oxygen deficiency 4. hydrography
---	---


 Morten Schaanning
 Prosjektleder

Forskningsleder
 ISBN 82-577-3721-6


 Bjørn Braaten
 Forskningsjef

Forord

Statens Vegvesen, Oslo, skal bygge veitunnel gjennom Bjørsvika og Bospvika i midre Oslo luvn. I den forbindelse er NIVA engasjert av Aus-Jacobsen A/S for å foreta en vurdering av effekter på vannkvalitet. Denne rapporten presenterer feltobservasjoner fra Bjørsvika sommeren 1999 og gir en vurdering av effekter og behov for tiltak på grunnlag av disse observasjonene og nylig reviderte planer for utbygging. Rapporten vil dels erstatte og dels komplettere notat utarbeidet av NGU og NIVA i juni dette år.

Oslo, 25. oktober 1999

Morten Schramming

Innhold

Sammendrag	5
1. Innledning	8
2. Topografi og reviderte planer for skjøstøtvolter og tunnel	9
3. Vannutskifningen i området	13
3.1. Måleprogrammet i 1999	14
3.1.1. Siktedyp	14
3.1.2. CHD-observasjoner	14
3.1.3. Måling med T/S kjede	15
3.2. Måleresultater	15
3.2.1. Siktedyp	15
3.2.2. CHD-målinger	17
3.2.3. Oksygen	17
3.2.4. T/S målinger	20
4. Diskusjon	21
4.1. Beregning av vannutskifning ut fra de hydrografiske observasjonene	21
4.2. Transportkapasiteten i kanalene til Hjørsvika og Bispevika	22
4.2.1. Innledning - forutsetninger for beregningene	22
4.2.2. Modell for trykkdrevet transport	23
4.2.3. Resultater	25
5. Konklusjoner	29
5.1. Hjørsvika	29
5.2. Bispevika	29
5.3. Generelt	30
6. Forslag til videre oppfølging	31
7. Referanser	32

Sammendrag

Bakgrunn og målsetting

Statens vegvesen, Oslo, planlegger fremføring av E18 i senketunnel gjennom Hjørvika og Bispevika. For å hindre sammenstøt fra skipstrafikken må tunnelen beskyttes med skipsstøtvoller som skal etableres mellom tunnelen og fjorden utenfor. Overkant av skipsstøtvollene vil danne terskler som begrenser utskiftingen av dypvannet innenfor anlegget. Målsettingen med NIVAs engasjement i dette arbeidet har vært å vurdere hvordan de planlagte konstruksjonene vil påvirke vannutskiftingen og oksygenforholdene i området etter utbygging. I teknisk notat fra NIG/NIVA 30.06.99 ble det skissert en del mulige tiltak. I løpet av sommeren er planene revidert på en slik måte at vannutskiftingen vil bli vesentlig bedre. I denne rapporten gjøres en mer inngående vurdering av vannutskiftingen i området basert på målinger utført i Hjørvika i perioden 30.04. til 17.08.99 og de reviderte planene for utbygging.

Målsetting for vannkvalitet etter utbygging

Miljømålene er valgt i henhold til SFT's vannkvalitetskriterier "egnethet for fritidsfiske". Denne normen regner et oksygeninnhold i bunnavannet på mer enn 2,5 ml/l for "egnet", og mer enn 4 ml/l for "godt egnet" til fritidsfiske. Målinger utført med sonde sommeren 1999 (se under) indikerer at oksygenforholdene nær bunnen i Hjørvika var noe dårligere enn forventet i forhold til overvåkingalata fra andre deler av havnebassenget. Det kan ikke forventes at utbyggingen skal bedre forholdene i recipienten i forhold til dagens situasjon. Derfor synes en målsetting på 2,5 mlO₂/l ("egnet") mest realistisk og samtidig tilstrekkelig til å unngå episoder med sjenerende lukt og fiskedød. Fjerning eller tildekking av forurensete sedimenter i Hjørvika og Bispevika antas å medføre en reduksjon av oksygenforbruket lokalt i forhold til dagens nivå, og en generell bedring av vannkvaliteten i fjorden utenfor havnebassenget vil kunne føre til økende oksygeninnhold i tilførselsvannet. For å få et sikrere grunnlag for vurdering av forholdene for utbygging anbefales at oksygenforholdene kartlegges med mer nøyaktige, kjemiske metoder (Winkler-titrering).

Observasjoner sommeren 1999

Målinger utført i Hjørvika viste temperaturvariasjon fra 5 til 20°C. Oppvarmingen denne sommeren gikk helt ned til bunnen på 8 m dyp. Påvirkning fra Akerselva ble observert i et ca. 1 m tykt overflatelag med lave saltholdigheter (7-10) over et sprangskikt mellom 1 og 2 m dyp. Denne lagtykkelsen ble svekket i siste halvdel av juli. Nær bunnen var det også betydelige variasjoner i saltholdighet (16 til 26). Disse variasjonene indikerte god vannutskifting med fjorden utenfor. Siktedypet varierte mellom 1 og 5 meter og oksygenminima målt med sonde i dypvannet varierte mellom 2,3 og 4,4 ml/l. I henhold til SFT's miljøkvalitetskriterier var siktedypet "dårlig" og oksygenforholdene "mindre gode". Målinger av oksygen med sonde til innledende måle og lå 1-2 ml/l lavere enn typiske konsentrasjoner i tilsvarende dyp i Bekkelagetbassenget.

Temperatur- og saltholdighet-sensorer plassert på faste punkter i vannmassen viste kortbudsvarsjoner ofte i stoffetresorden 1 dag eller mer. Målingene indikerte gjennomsnittlige transporten på 1,2-1,3 m³/s i dypvannet under 4 m, og karakteristiske utskiftingsstider fra mindre enn en dag opp til 5-6 dager.

I tidligere notat har vi betegnet at vannutskifting 2x pr uke ville være tilstrekkelig for å tilfredstille kravet på 4 mlO₂/l. Beregningen var basert på utført oksygenforbruk i sedimentet på 1 mmolO₂/m²/h og oksygeninnhold 5,6 ml/l i innstrømmende vann. Felteundersøkelsene har vist at utskiftings-hastigheten for utbygging ligger omtrent i dette størrelsesorden, men at et mer realistisk scenario vil være at det innstrømmende vannet ikke inneholder mer enn i snitt en 4 mlO₂/l. En vannutskifting på 2x pr uke vil med samme forutsetninger forøvrig, gi et oksygen nivå på ca. 2,5 ml/l på innsiden av

tunnelen. Selv om det antatte oksygenforbruket ble satt noe høyt i forhold til det som kan forventes etter fjerning eller tildekking av de forurensede sedimentene innenfor skipsstøtvollene, vil en i de mest kritiske periodene kunne få nivåer om 4 mg/l i tilførslesvannet. Det synes derfor klart at marginene er små og at akseptable oksygenivåer bare kan opprettholdes dersom utbyggingen skjer uten vesentlig reduksjon av utskiftingshastigheten.

Reviderte utbyggingsplaner

Ifølge de reviderte utbyggingsplanene (per september 1999) skal skipsstøtvolten i Bispevika bygges med overkant på 2m dyp (-2m). Vannutskiflingen skal avhjelpes med en trapesformet kanal med antatt bredde 12 m ved skipsstøtvolten (-2 m) og 3 m ved bunnen (-7,3 m). Kanalen legges delvis innunder kaia på Sorenga. I Bjørvika skal skipsstøtvolten overkant ligge på 4 m dyp over det meste av bukta. Tilsvarende som for Bispevika tenkes vannutskiflingen avhjelpet med en trapesformet kanal langs Bjørvikautstikkeren med bredde 12 m i 4m dyp og 3m ved bunnen. På vestsiden av Bjørvika stiger tunneltraket til 2-3 m dyp. På begge sider etableres skipsstøtvolter med dyp 2m. Dermed dannes to små bassenger som krever separate løsninger for vannutskifling. Selvs tunnelen har etter de reviderte planene liten overhøyde i forhold til sjøbunnen innenfor. Det er vanskelig å forutsi effektene av en overhøyde på 1-2 m, men generelt anbefales at overhøyden gjøres så liten som mulig over så store deler av tverrsnittet som mulig.

Vannutskifling gjennom kanalene

Vannutskiflingen vil drives av forholdene i fjorden utenfor skipsstøtvollene ved at det bygges opp horisontale tetthetsgradienter gjennom kanalene. Når tettheten øker på utsiden vil vann presses inn gjennom kanalene. Omvendt vil vann strømme ut gjennom kanalene når tettheten avtar. Jo større tetthetsforskjellene blir, og jo tåkere tetthetsforskjellene bygges opp, jo større blir strømhastigheten gjennom kanalene. For å vurdere hvordan kanalene vil påvirke vannutskiflingen i hovedbassengene i hhv. Bjørvika og Bispevika, ble det utviklet en beregningsmodell for tetthetsdrivet transport gjennom kanalene. Beregninger med modellen viste at det kan bli vesentlig demping av den del av utskiflingen av vannet under 6 m dyp i Bjørvika som i dag er knyttet til raske svingninger i tetthetsflatene, dvs. med utskiflingstider 3 dager eller mindre. Her kan det bli en merkbar reduksjon av utskiflingen. En utskiflingshyppighet på 1 gang per uke bør kunne oppnås, men det er mer tvilsomt om en oppnår 2 ganger pr. uke med den skisserte kanalen alene uten å sirkulere bassenget ved f.eks. nedpumping av ferskvann. En annen mulig løsning er å legge inn rør i bunnen av fyllingen i tillegg til den skisserte kanalen, med til sammen 6 m² tverrsnitt. For Bispevika vil en kanal som skissert gi ganske god utskifling, og lite demping av vertikale svingninger, og her bør målsettingen om utskifling 2 ganger per uke være realistisk uten kunstig sirkulasjon. I begge bassenger bør det legges inn nødvendige rørforbindelser under bygging av tunnelen, som forberedelse til nedpumping av ferskvann dersom det skulle vise seg nødvendig.

Konklusjoner

Kanalene med de antatte tverrsnittene synes således å kunne gi en tilfredsstillende løsning med hensyn til vannfornyelsen i Bispevika, og det gjelder også Bjørvika dersom en kan legge inn noen rør i bunnen av nedre del av skipsstøtvolten i tillegg til den skisserte kanalen. Det må imidlertid tas forbehold om at usikkerhetene er betydelige både vedrørende oksygenforbruk og de fysiske beregningene av vannutskiflingen. Dessuten er oksygenforholdene dårlige i utgangspunktet, noe som gjør at det er relativt små marginer for kritisk lave nivåer inntreffer. Det vil derfor være nødvendig å ha en plan for hvordan vannutskiflingen skal kunne bedres dersom det i ettertid viser seg at oksygenforholdene blir uakseptabelt dårlige, og hensiktsmessige tiltak, som f.eks. rørforbindelser for nedpumping av ferskvann fra Akerselva, bør tilrettelegges/forberedes ved bygging av tunnelen.

Den enkleste løsningen vil trolig være pumping av vann fra Akerselva og ut gjennom diffusoren nær bunnen, først og fremst i Bjørvika, men det kan ikke utelukkes at et slikt tiltak også vil bli nødvendig for å oppnå tilfredsstillende vannutskifling i Bispevika.

Forholdene i det lille bassenget innenfor tunnelen vest i Bjørvika vil trolig kunne få en tilfredsstillende vannkvalitet ved en forbindelse gjennom to eller flere rør (diameter 1.2m) gjennom skipsstøtvolten nær bunnen. Forholdene i det lille bassenget på utsiden av tunnelen vil ikke representere noe problem dersom den planlagte kanalen langs kaianten vest i Bjørvika gjøres tilstrekkelig dyp (-8m).

Prinsipielt kan best mulig vannkvalitet sikres ved

- oppfylling av dype områder der hvor dette er mulig
- overhøyde mellom tunneltak og sjøbunnen innenfor gjøres minst mulig over størst mulig strekning
- kanalene gjennom skipsstøtvolleene gjøres så brede som mulig, særlig ved bunnen
- kanalene suppleres så mye som mulig med turgjennomføringer og/eller permeable masser

Anbefalt overvåking

For å kunne gi sikrere råd for anlegget virkeliggjøres, og kunne følge med eventuelle effekter av tunnelanlegget når det er ferdig, bør det opprettes et overvåkingsprogram sårest slik at en kan få en statistisk sett tilstrekkelig dokumentasjon av forholdene før byggearbeidene starter. Denne overvåkingen bør starte i år 2000. Hensikten er å sikre seg bedre kjennskap til området enn en har i dag, og derved gi grunnlag for å kunne bestemme eventuelle forandringer i miljøet når tunnelen og barrierene er på plass. Et slikt måleprogram vil omfatte observasjoner av siktedyp, sjiktning, oksygen samt måling av strøm over en langre periode. Oksygen må måles med presisjonsanalyser (Winkler) og ikke bare med sonder.

1. Innledning.

Statens Vegvesen, Oslo, skal bygge ventunnel gjennom Bjørvika og Bispevika i indre Oslo havn. I tidligere NIVA-rapporter (Berge og Molvær, 1994, Sundtjød et al., 1999) og NGU/NIVA-notat (Hauge og Schaanning, 1999) var den viktigste forutsetningen for vurdering av vannkvalitet, at det skulle bygges skipsstøtvoller med seilingsdyp 2 m mellom tunnelen og havneområdet utenfor. I løpet av sommeren 1999 er planene endret slik at skipsstøtvollene kan senkes til 4 m seilingsdyp over det meste av Bjørvika, mens barrieren på 2 m opprettholdes tvers over Bispevika. I tillegg til dette bortfaller den tidligere kanalen med seilingsdyp 4 m inn til Bjørvika så vel som skipsstøtvollen innenfor tunnelen i Bjørvika. Dette medfører et åpnere system med mindre oppstykkning til småbassenger mellom tunnelen og skipsstøtvollene.

Skipsstøtvollene vil påvirke vannutskiftningen og gi risiko for stagnerende vannmasser innenfor konstruksjonen. Dette kan føre til oksygenmangel og dannelse av hydrogen-sulfid (råttent vann) nær bunnen. Fiskekoll som følge av oksygenmangel i vannmassene har så sent som i 1995 vært observert i havnebassenget og Bekkelagsbassenget (Magnusson et al., 1996).

Berge og Molvær (1994) fant at vannutskiftningen ville bli redusert både i øvre lag og i dypvannet i de innelukkede områdene. I dypvannet var det antatt at det fort ville oppstå dårlig vannkvalitet, med stor risiko for periodevis dannelse av hydrogen-sulfid. I øvre lag ble det ikke forventet noen spesiell forverring av forholdene. En del mulige tiltak som kan øke vannutskiftningen ble også vurdert. Den siste utredningen (Sundtjød et al., 1999, Hauge og Schaanning, 1999) betegnet behovet for vannutskiftning på grunnlag av estimert oksygenforbruk og en miljømålssetting for oksygen i bunnavannet på minimum 4,0 ml/l. Videre ble det skissert tre alternative tiltak for å avbøte stagnasjonsproblemet:

1. Gjendypning av de delene av området som ikke får tilfredsstillende utskiftning på "naturlig" vis.
2. Direkte utskiftning (gjerning ved pumping) av sjøvann inn bak støtvoll/tunnel, eller pumping av vann ut slik at nytt vann strømmer inn over middelet som kompensasjon.
3. Injeksjon av ferskvann gjennom diffusor ved bunnen for å redusere tettheten i bunnavannet og dermed bedre utskiftningen med nytt vann som tilføres umentra over skipsstøtvollene.

I tillegg ble det vurdert rengjøringsforinger for å løse problemene i flere av de mindre bassengene mellom skipsstøtvollene og tunnelen.

I løpet av våren og forsommeren 1999 er det foretatt målinger i sjøen i Bjørvika for å beskrive forholdene lokalt samt framskaffe et bedre grunnlag for hydrofysiske beregninger. Disse målingene og resultatene av nye beregninger er presentert her, i tillegg til vurdering av det endrete planforslaget med foreslåtte tiltak for sikring av vannkvalitet.

2. Topografi og reviderte planer for skipsstøtvoller og tunnel

Hjørvika og Bispevika er to bassenger i Oslo indre havn som har åpen forbindelse med havnebassenget og fjorden utenfor. Mellom bassengene er utløpet av Akerselva, som er den eneste ferskvannstilførselen i området. Bassengene er 7-9 meter dype og har i dag ingen terskler som begrenser vannutskiflingen.

Prinsippskisse av det reviderte planforslaget for senkerunnelen med skipsstøtvoller er vist i Figur 1. Tilsvarende prinsippskisser av de viktigste tverrsnittene av tunnel og skipsstøtvollen gjennom Hjørvika er vist i Figur 2 - Figur 4. Beregnete flateareal og underliggende vannvolum for ulike dyp er vist i Tabell 1. For Hjørvika er maks. dyp angitt til 12,1 m i tabellen, det gjelder et mindre område mellom tunneltårnen og skipsstøtvollen i følge nåværende topografi. En viktig forskjell fra tidligere alternativer er at tunnelen i større grad legges ned i sedimentene slik at overhøyden i forhold til bunnen innendørs er blitt langt mindre over store deler av begge bassengene. I tillegg er skipsstøtvollen senket fra 2 til 4 m dyp i Hjørvika og det er skissert muligheter for å skjære gjennom barrierene med kanaler langs kirkantene.

Hjørvika

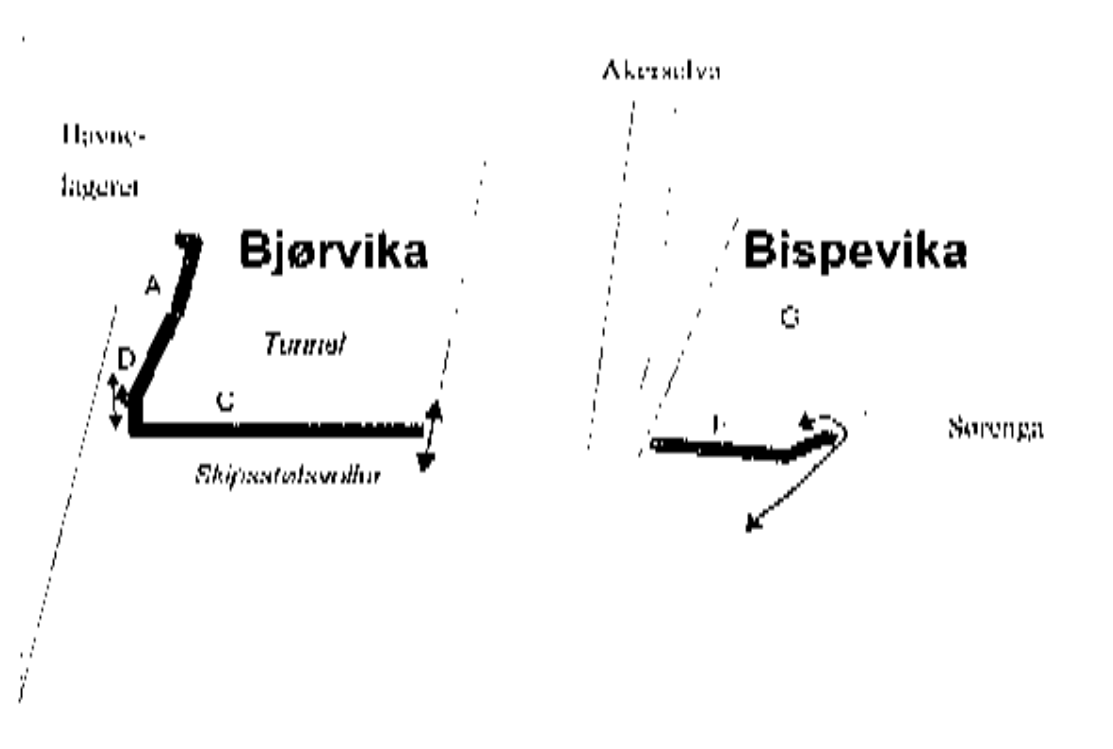
Skipstøtvollen på innsiden av tunnelen i Hjørvika er fjernet helt og dypet ned til overkant av skipsstøtvollen er øket fra 2 til 4 m. Tverrsnittsarealet fra overflate til 4 meters dyp (ca. 990 m²) blir lite påvirket av utbyggingen. Utskiflingen i 0-4m laget vil bli tilsvarende lite påvirket.

I tillegg er det skissert muligheter for en kanal inn til Hjørvika ned til ca. 8 meters dyp på øst siden av Hjørvika, delvis innunder kam. Kanalen vil danne en viktig forbindelse for utskifling av vannmassene i Hjørvika og med det tidligere innelukkede området mellom den ytre vollen og tunnelen. Kanalen ved utstikkeren i øst antas i denne rapporten å bli trapesformet med en bredde på 3 m i 8 m dyp og 12 m i 4 m dyp. Dette gir et tverrsnittsareal på 30 m² for kanalen gjennom skipsstøtvollen i Hjørvika.

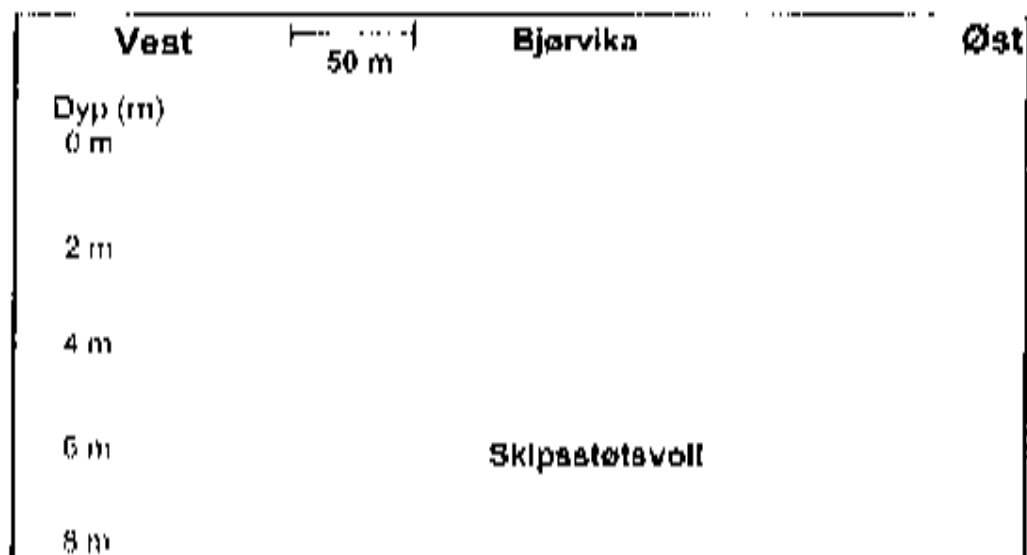
Tverrsnittet over selve tunnelen er vist i Figur 3. Hele tverrsnittsarealet for vanngjennomstrømming over tunnelen er større enn for barrieren og i utgangspunktet blir dimensjonene for skipsstøtvollen den begrensende faktoren for gjennomstrømming.

Område C (Figur 1) som tidligere var et problemområde inestengt mellom tunnelen og skipsstøtvollen vil nå få en relativt åpen kommunikasjon med resten av Hjørvika og et område B (se Sundfjord et al., 1999) som tidligere lå mellom tunnelen og indre skipsstøtvoll bortfaller helt.

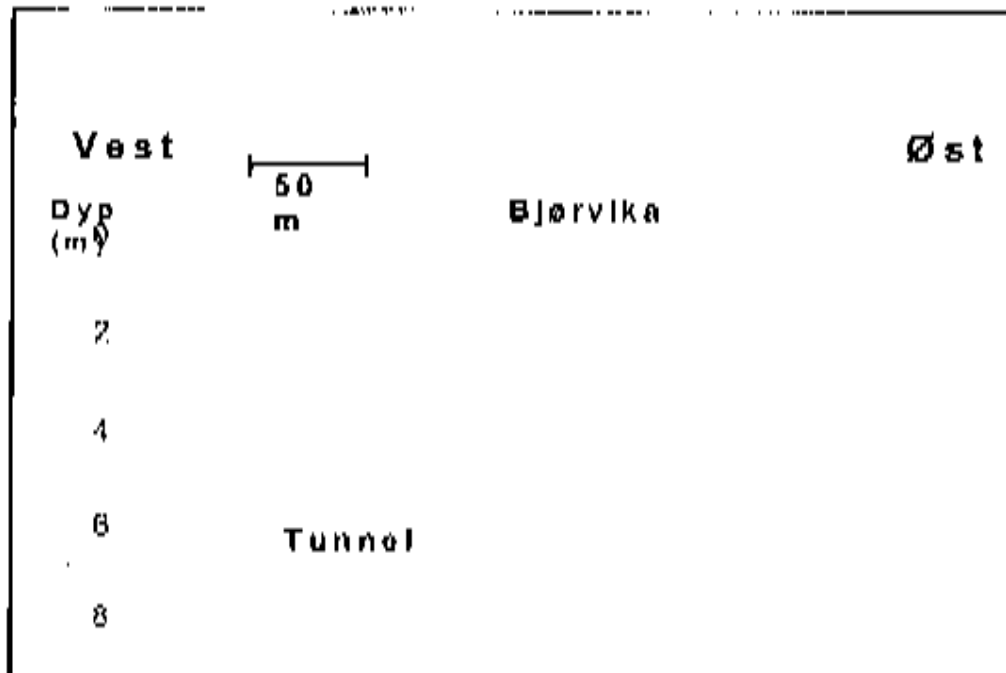
To områder er fortsatt innelukkede "pøller". Det er område A og D i Figur 1 som er innelukket av vollen opp til 2 meters dyp. Område A har et areal på 1.600 m² og et volum på 11.400m³ under 2 meters dyp. Det er foreslått at område A forbindes med Hjørvikabassenget gjennom 2 rør nær bunnen med diameter 1,2 m. Område D har et overflateareal på 140 m² og et volum på 1.800 m³ under 2 meters dyp. Det er foreslått at område D forbindes med fjorden utenfor gjennom gjennom en kanal nær kirkanten ved Havnelageret.



Figur 1. Forenklet skisse av tunnøt og skipsstøtsevuller og plassering av kanaler for økt gjennomstrømming (illustrert med pile).



Figur 2. Tverrsnitt av skipsstøtsevullen i Bjørvika med kanal plassert delvis under Bjørvikantstikkeren. Grov skisse.



Figur 3. Tverrsnitt av tunnelområdet i Bjørvika. Grov skisse.



Figur 4. Tverrsnitt over tunnel i Bispevika. Grov skisse.

Tabell 1. Areal- og volumforhold innenfor skipsstøtveggene for Bjørsvika og Bispevika for eksisterende plan, beregnet ut fra dagens topografi.

	Dyp (m)	Areal (m ²)	Volum under gitt dyp (m ³)
Bjørsvika	0	82 500	514 600
overkant av skipsstøtvegg:	4	68 400	212 800
	6	53 600	90 800
største dyp over tunnelen:	7		
kanaldyp:	8	19 500	17 700
	9	5 700	5 100
	10	1 400	1 500
	12,1	0	
Bispevika	0	49 900	258 500
overkant av skipsstøtvegg:	2	48 700	159 900
	4	37 000	74 200
største dyp over tunnelen:	6	24 000	14 200
	7	3 800	800
kanaldyp:	7,4	0	

Bispevika

Senkingen av tunnelen påvirker også Bispevika. Tverrsnittet over tunnel-taket er vist i Figur 4. Totalt tverrsnittsareal er ca. 390 m², hvorav tverrsnittsarealet under 2,5 meters dyp er på 158 m², og det er åpning ned til 6 m dyp på vestsiden.

Skipsstøtveggen er ikke forandret og med dybde fortsatt på 2 m er det denne som vil begrense vannutskiflingen. Imidlertid er det skissert en kanal inn til området mellom vegg og kai ved Sørenga (Figur 1). Den skisserte kanalen er i denne rapporten antatt trapezformet med 12 m bredde i 2 m dyp og 3 m bredde ved bunnen (7,4 m dyp). Dette gir et tverrsnittsareal for kanalen gjennom skipsstøtveggen i Bispevika på 40,5 m².

3. Vannutskiftningen i området.

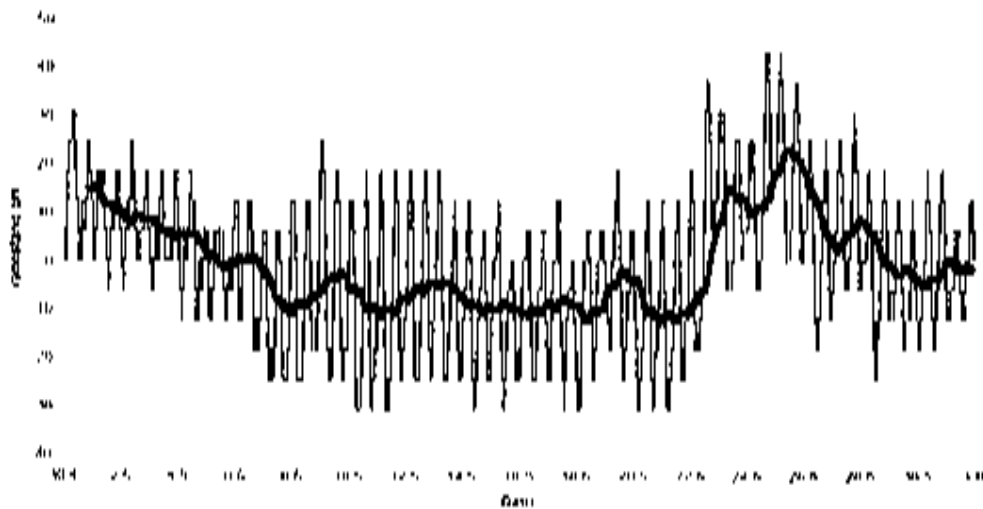
Dagens vannutskifting styres av forhold i Bunnelfjorden og Vestfjorden og påvirkes av tidevann, vind og lufttrykkvariasjoner. Tidevannet bidrar daglig til vannflomyelsen, mens de andre faktorer varierer mindre regelmessig. Tabell 2 viser noen nøkkeltall for vannstandsvariasjonene i indre Oslofjord. Vi har der beregnet amplituder i forhold til normal middelvannstand, siden det er dette som har mest betydning i forhold til vannutskiftingen. (For navigasjonsmessige betraktninger er det ellers vanlig å ta utgangspunkt i høyvannnivået ved vårjevndøgn som er 31 cm under middelvannstanden i indre Oslofjord.) Høyeste og laveste målte vannstand omfatter den totale variasjonen i vannstand basert på historiske data. Tallene for høyvann/lavvann er basert på tidevannstabellen, og omfatter bare de astronomiske komponentene. Her vil derfor bidrag fra lufttrykkvariasjoner og vind komme i tillegg.

Angitte dyp (-2,0 og -4,0 m) for skipsstatvollene refererer seg til vårjevndøgn spring høyvann. Midlere seilingsdyp blir derfor større, hhv. 2,31 og 4,31 m. Tidevannsprismet, dvs. volumet av vannet mellom høyvann og lavvann som normalt strømmer inn på floende sjø bestemmes av høyden mellom middel lavvann og middel høyvann, dvs. 28 cm. Historisk laveste målte vannstand ville gitt seilingsdyp over skipsstatvollene på bare litt i overkant av 1 m i Bispevika, 3 m i Bjørvika.

Figur 5 viser observerte trykkvariasjoner på fast dyp i forhold til vann i Bjørvika 1999. De kortperiodiske variasjonene viser vannstandsvariasjoner knyttet til tidevannet, mens den langperiodiske variasjonen er den kombinerte virkningen av tidevann, vind og lufttrykk. Dataene er ikke korrigert for variasjoner i lufttrykk. Slik korleksjon kunne gitt et mer nøyaktig bilde av de faktiske variasjoner i vannstanden i Bjørvika i mai 1999. Lufttrykket varierer med et standardavvik på omtrent 11,7 % og maksimalt 3-4 % fra middelveid (data for Bærdal 1997). Standardavviket tilsvarer en vannstandsforskjell på 12 cm og maksimalutslaget 30-40 cm.

Tabell 2. Størrelse på ulike amplituder i vannstandsvariasjonen i indre Oslofjord, i forhold til middelvannstanden (verdier beregnet fra Tidevannstabellen, Statens kartverk, Spøkartverket).

Faktor	Returperiode	Amplitude/utslag
Høyeste målte vannstand	flere år	+ 188 cm
Høstjevndøgn spring høyvann	1 år	+ 31 cm
Middel spring høyvann	14 dgr	+ 18 cm
Middel høyvann	12,5 timer	+ 14 cm
Middel napp høyvann	14 dgr	+ 10 cm
Middel vannstand	6,25 timer	0
Middel napp lavvann	14 dgr	- 10 cm
Middel lavvann	12,5 timer	- 14 cm
Middel spring lavvann	14 dgr	- 18 cm
Vårjevndøgn spring lavv.	1 år	- 31 cm
Laveste målte vannstand	flere år	- 105 cm



Figur 5. Variasjon i trykk (som en vannstand) målt på fast dyp i forhold til bunnt i mai 1999 som avvik fra middelverdi for mai 1999, samt 24 timers glidende middel (tykk kurve). Det er ikke korrigert for lufttykksvariasjoner.

3.1. Måleprogrammet i 1999

For å få bedre informasjon om forholdene i Bjosvika ble det for det første lagt inn ekstra observasjonen i det ordinære miljøovervåkingsprogrammet for indre Oslofjord. Utvidelsen besto i å observere siktedyp, dyp-profil av temperatur og saltholdighet (CTD) ca. en gang i uka i perioden 1.6. til 30.8.1999. I tillegg ble det i mai 1999 satt ut et instrument (1/8-kjode) som måler tilnærmet kontinuerlig vannets temperatur og saltholdighet i fem faste nivåer. Hensikten var å kartlegge kulltilsvariasjonene i sjiktningen i området.

3.1.1. Siktedyp

Siktedyp ble målt med Secchi-skive til samme tidspunkter og på samme posisjon som CTD-målingene (Figur 6).

3.1.2. CTD-observasjoner

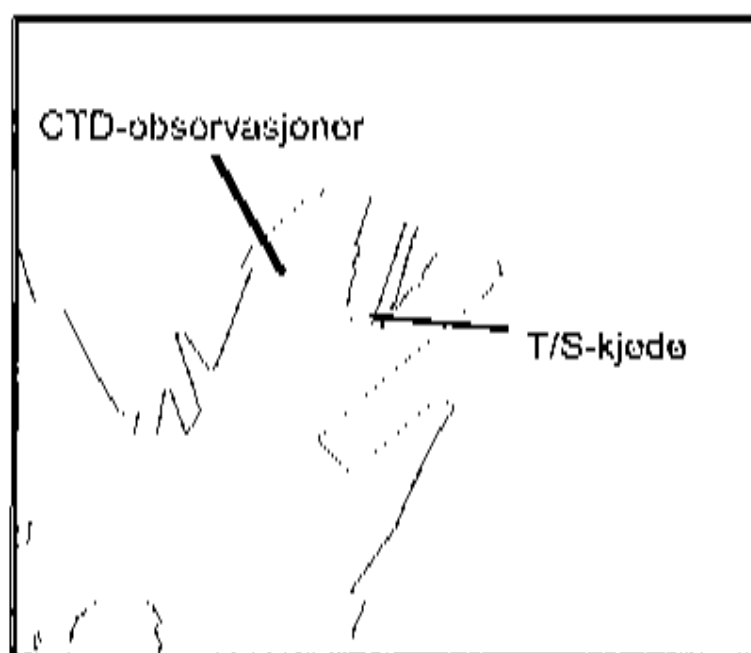
Vertikalprofiler av sjøens temperatur og saltholdighet målt i Bjosvika ble målt med sonde (Seabird SBE19) i alt 11 ganger i løpet av sommeren 1999 (Figur 6).

Måledatoene var:

 Juni: 1., 8., 16., 23. og 29.
 Juli: 6., 21. og 27.
 August: 3., 9. og 17.

Målingene ble gjort fra båt, og fra overflaten og til bunnt med tette dypdeintervaller.

Sonden registrerte også oksygen.



Figur 6. Grov kartskisse med måleposisjoner for T/S-kjede og hydrografiske profiler (CTD). Siktedyb ble målt på stasjonen for CTD-observasjoner.

3.1.3. Måling med T/S kjede

Målingene ble utført kontinuerlig i perioden 29. april – 3. juni, 1999, fra ytersida av Bjørvika utsikkeren (Figur 6). Til målingene ble det benyttet en T/S kjede fra Aanderaa Instruments. Den måler temperatur og saltholdighet i fem forhåndsbestemte dyp, og i programmerte tidsintervaller. Tidsintervallet var satt til 10 minutter. I tillegg måles trykket i ett dyp, fast plassert i forhold til bunnen. Siden dette dypet er fast i forhold til bunnen, vil trykket (korrigert for variasjoner i lufttrykk) gi et direkte bilde av vannstandsvariasjonene.

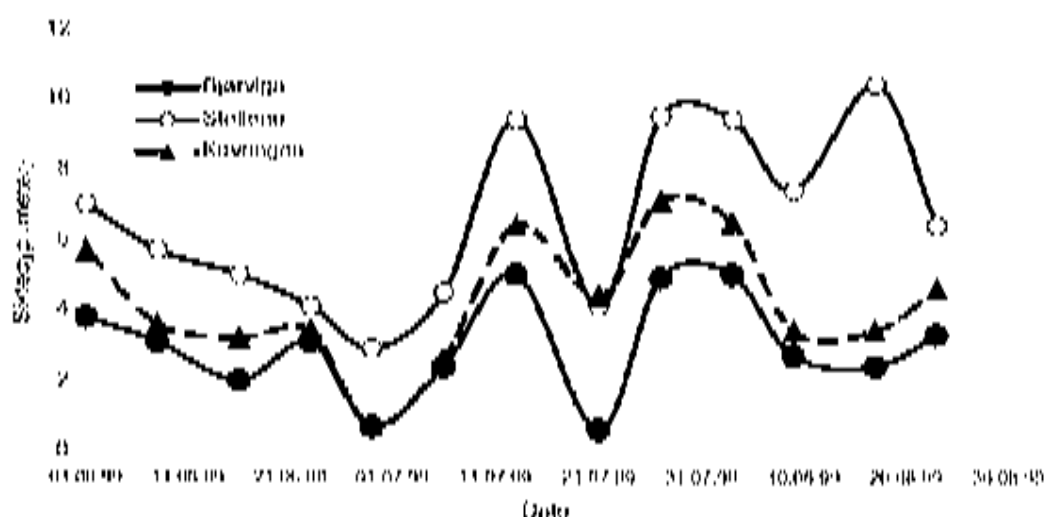
Måledypene for saltholdighet og temperatur var: 0,4 m, 3,5 m, 5,5 m, 7,5 m og 9,4 m. Trykket ble målt i en 1 m dyp.

3.2. Måleresultater

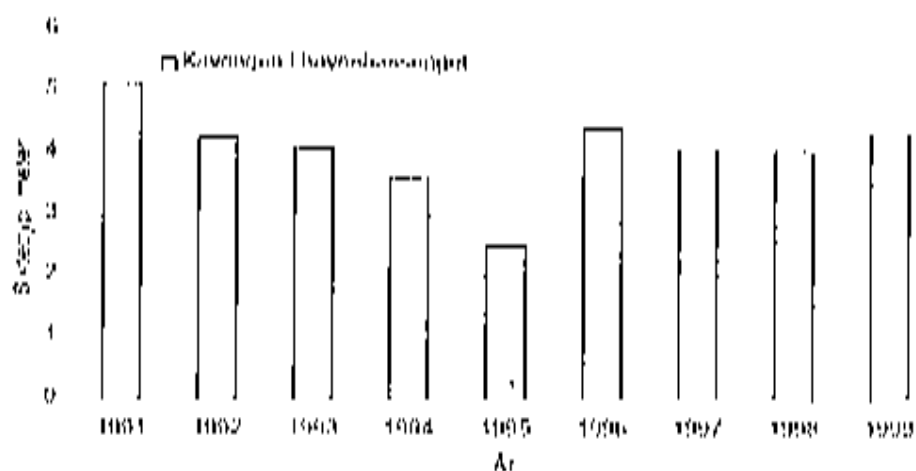
3.2.1. Siktedyb

Resultatene av siktedybmålingene er vist i Figur 7. Gjennomsnittlig siktedyb sommeren 1999 var 3,1 m. Sammenlignet med SF 1's miljøkvalitetskriterier for fjorder (Molvær et al., 1997) var tilstanden dårlig (miljøklasse IV).

Målingene varierte fra mindre enn 1 meter til dypere enn 5 meter. Variasjonen kan skyldes mange faktorer som tilførsel av partikler med flomvann fra Akerselva, algeoppblomstringer, oppvirvling av sedimenter med propeller på større skip. Figur 7 viser at siktedypet i Bjørvika følger siktedypet lengre ut i fjorden men på et lavere nivå.



Figur 7. Siktedypet i Hjørvinga 1999, sammenlignet med siktedyp ved Kavringen lenger ute i havnebassenget og Stillemer (Vestfjorden).



Figur 8. Gjennomsnittlig siktedyp juni-august ved Kavringen i havnebassenget 1991-99.

Siktedypet er et resultat av innholdet av partikler (i hovedsak leirpartikler og plankton) i overflatevann, og gir samtidig et mål for nedre grense for mulig primærproduksjon (dvs. så langt ned det er tilstrekkelig lys for fotosyntese). Denne nedre grense er omtrent $2.5 \times$ siktedyp, hvilket skulle bety at sommeren 1999 varierte primærproduksjonsdypet mellom 2.5 m dyp og bunnen. Gjennomsnittlig siktedyp sommeren 1999 var 3.1 m, dvs. et primærproduksjonsdyp på ca. 7.8 m.

Sommeren 1999 var lite typisk for Østfjorden. Store nedbørmengder i juni på ekstra store tilførsler av partikler og næringsstoffer ved at elvene flommet og avløpsvann fra renseanlegg gikk i overløp. Likevel ble gjennomsnittlig siktedyp i indre Østfjord (Kavringen) lite forskjellig fra normalt for juli og august (Figur 8). Forutsatt at 1999-forholdene var like representative i Hjørvinga som ved Kavringen skulle det gjennomsnittlige siktedypet på 3 m nådd de samme sommeren, være representativt for Hjørvinga i dag. I gjennomsnitt vil fotosyntesesesonen derfor gå ned til ca. 7.5 meters dyp, dvs. nesten til bunn.

Dette betyr at forholdene er slik at produksjon av organisk materiale (planteplankton, makro alger) vil kunne forekomme i nesten hele vannsøylen fra overflate til bunn i Bjørvika og Hjørsvika.

3.2.2. CTD-målinger

Resultatene av CTD-målingene er vist i Figur 9. Tidsoopløsningen er en 1 uke. Forholdene i Bjørvika endret seg raskest i begynnelsen av juli og i midten av august. Frem til begynnelsen av juli var det et markert overflatelag ned til ca. 1 m dyp over et ca. 1 m tykt sprangsjikt. Uvanlig store nedtur i juni var årsaken til de lave saltholdighetsverdiene i perioden (innflytelse av flom i Akerselva). Dette er sannsynligvis også forklaringen på situasjonen omkring den 20. juli. Resten av perioden (august 99) var overflatelaget i Bjørvika mer homogent med svak sjikning i profilen fra 27. juli. Dette framgår også av temperaturen, som økte gradvis til et maksimum på 20-21 grader i slutten av juli. Figuren viser også at det utover i august måned, kom inn en noe kaldere vanntype med høyere saltholdighet nær bunnen.

Isolinje-plottet for tetthet (σ_t) gjenspeiler variasjonene i saltholdighet og temperatur, med svak sjikning (lagdeling) i slutten av juli, og sterkest i juni.

Vannstrømningen kan bestemmes utenhverve ut fra variasjonene fra måletidspunkt til måletidspunkt. Observerte endringer i hydrografi over tid gjenspeiler sannsynligvis endringen i hele indre havnebasseng, og ikke bare Bjørvika. En kan minne at endringer utenfor raskt (i løpet av en dag eller to, eller raskere) forplanter seg inn i Bjørvika, både i overflaten og i dypet. Det framgår av profilene at det ikke var lik situasjon fra uke til uke mellom noen av målingene. Det betyr at det var en viss kontinuerlig utskifting i hele vannsøylen gjennom måleperioden. Evt. stagnasjon kan teoretisk ha skjedd i kortere perioder, på skala fra noen dager og opp til en uke. Resultatene fra T/S kjeden gir mer informasjon om slike korttidsendringer.

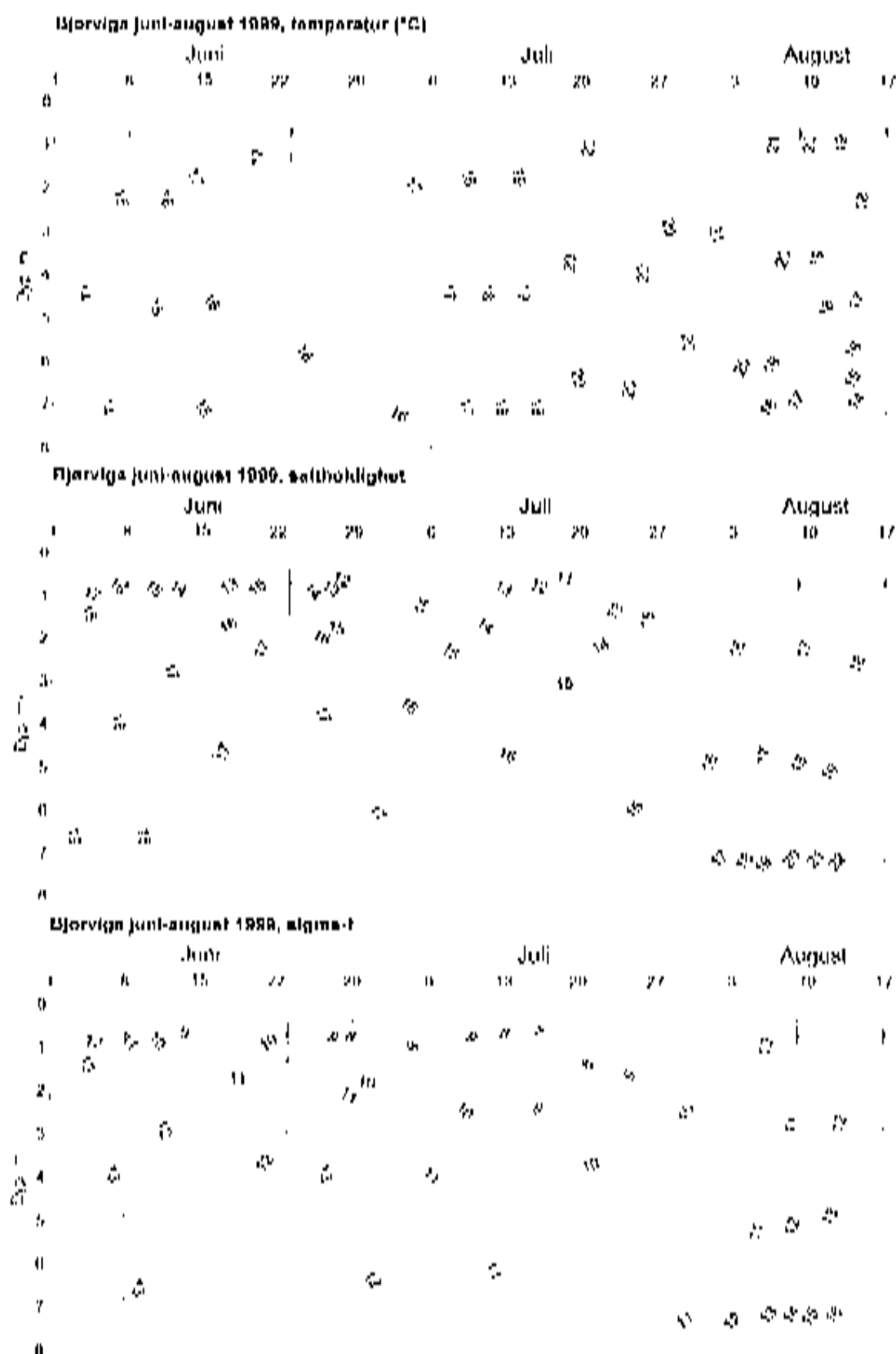
3.2.3. Oksygen

CTD-sonden var utstyrt med en YSI oksygenmåler. YSI-sonder kan observere variasjoner av oksygen *in situ* i sjøvann er ikke presisjonsinstrumenter og vil kunne avvike betydelig fra reelle forhold. Normalt skal slike observasjoner som et minstekrav kontrolleres med tradisjonelle analyser (Winkler), men det var i utgangspunktet ikke planlagt å måle oksygen i Bjørvika.

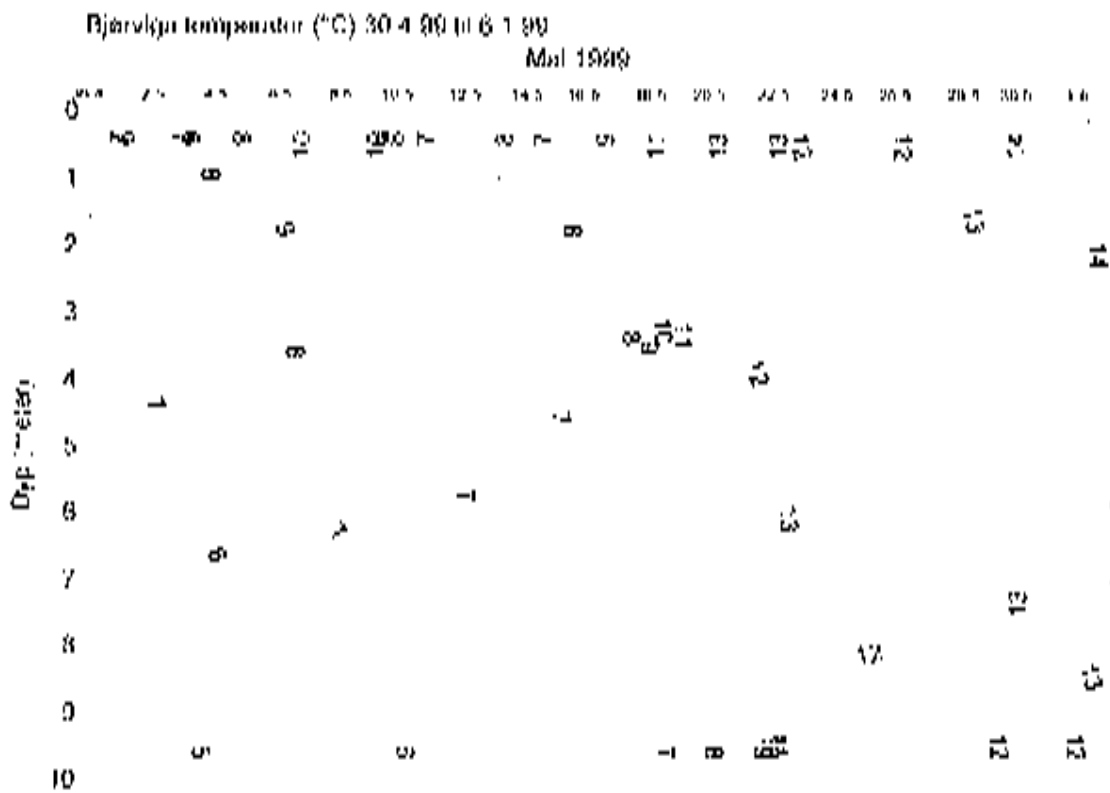
Sonden viste noe lavere oksygeninnhold enn forventet. Nær bunnen (7-8 m dyp) varierte verdiene fra 2,3 til 4,4 ml/l med et gjennomsnitt på 3,2 ml/l. I henhold til NVE's kriterier for klassifisering av tilstand (Molvær et al., 1997) vil verdier mellom 2,5 og 3,5 ml/l tilsvare miljøklasse III "mindre god". Dette må tolkes med forsiktighet fordi sondemålinger er usikre.

Overvåkingsdata fra Bekkelagsbassenget fra 1983-97 viser at oksygenkonsentrasjonen på 8 meters dyp varierer mellom 0,5 til 9,5 ml/l over året. 25% av målingene lå mellom 0,5 og 2,8 ml/l. Medianverdi var ca 5 ml/l. På 12 meters dyp var variasjonen mellom 0,4 og 9,4 ml/l, med medianverdi på 3 ml/l.

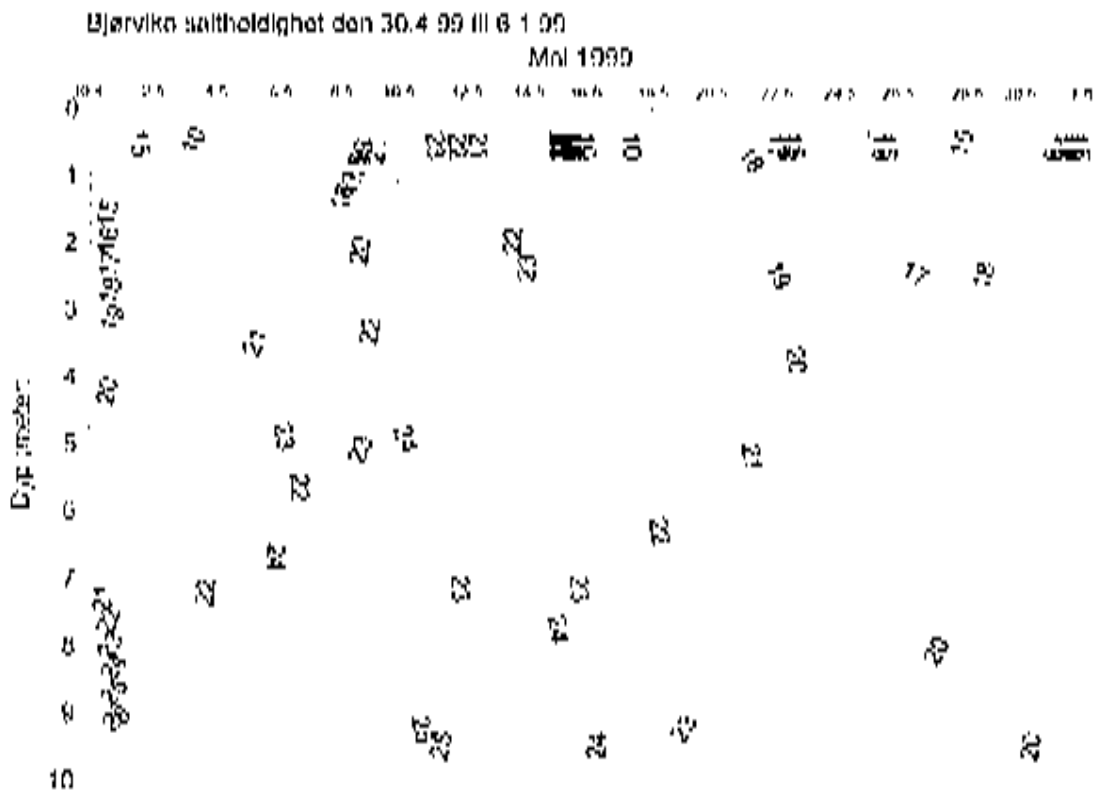
Sondeobservasjonene fra Bjørvika 1999 lå gjennomgående 1-7 ml/l lavere enn observasjonene fra tilsvarende dyp i Bekkelagsbassenget, men observasjonsperioden var kort og derfor lite representativ. Tar en i betraktning at 25 % av observasjonene fra Bekkelagsbassenget hadde en konsentrasjon mindre enn 2,8 ml/l, kan det ikke utelukkes at sondeobservasjonene er korrekte og viser enten at målingene ble gjort i en dårlig periode eller at det generelt er mindre oksygen i vannmassene i Bjørvika enn i Bekkelagsbassenget.



Figur 9. Isolinje framstilling av CTD-måledata for temperatur (øverst), saltholdighet (midten) og sjøvannets densitet (σ_{θ}). Målepunkter er vist med vertikale stiplete linjer.



Figur 10. Temperaturobservasjoner (°C) fra Bjørvika mai 1999. Observasjoner fra T/S-kjede.



Figur 11. Saltholdighetsobservasjoner fra Bjørvika mai 1999. Observasjoner fra T/S-kjede.

En kan fastslå ut fra T/S-målingene at det er vesentlig større endringer i overflatelaget enn dypere ned. I dypet er det imidlertid også kortidsvariasjoner. Kortidsvariasjonene kan ikke knyttes til tidevann. Variasjonene var spesielt tydelige i perioden fra start av måleserien i slutten av april og fram til ca. 22. mai. Deretter oppstod det tilsynelatende en ny situasjon, med svært små, men dog, målbare, variasjoner fra 3,5 m og ned.

3.2.4. T/S-målinger

Målingene fremstilt i Figur 10 og Figur 11 viser kortidsvariasjoner (skalafimer) i temperatur og saltholdighet. Saltholdigheten er mest interessant fordi variasjonene må reflektere direkte vannutskifting med området utenfor. Temperaturendringer kan i prinsippet skje ved lokal oppvarming/avkjøling uten utskifting, men i et lite avgrenset område som Bjørvika er mesteparten av temperaturforandringene på dyp større enn ca. 4 m sannsynligvis advective på samme måte som saltholdighetsvariasjonene.

Målingene viser sterkeste lagdeling i slutten av april, med saltholdighet rundt 7-10 i overflata. Fra da og fram til ca 15. mai økte overflatesaltholdigheten, mens den øyde i dypvannet fra ca. 22 til 25. Deretter tok lagdelingen igjen ved at saltholdigheten øyde i overflatelaget ned til 3,5 m.

Nær overflata (øverste sensor) var det etter 15. mai fortsatt hurtige variasjoner i saltholdighet mellom en nedre grense på 7-8 og en øyde grense på 17-18. Disse variasjonene skjedde for det meste innenfor tidsrom på 1/2 dag eller hyppigere.

4. Diskusjon

For øvre lag i Bjørvika, dvs. for vann ned til 3-4 meters dyp, vil utskiflingen neppe bli merkbart endret i forhold til dagens situasjon. Vannkvaliteten blir dermed heller ikke vesentlig endret, med unntak av periodisk forringelse i forbindelse med vertikal blanding med dypvann av eventuell dårlig kvalitet. Det samme gjelder i prinsippet for Bispevika ned til 1-2 meters dyp.

På dyp større enn 4 meter i Bjørvika og større enn 2 meter i Bispevika er det risiko for stagnerte vannmasser og oksygensvikt. Tidligere overslagsberegninger (Sundfjord et al., 1999) viste et behov for full vannutskifling 1-2 ganger per øke for å tilfredstille en målsetting på 4 mgO₂/l i dypvannet. Sønden benyttet sommeren 1999, ga konsentrasjoner lavere enn denne målsettingen. Dersom disse målingene kan bekreftes med mer nøyaktige metoder, vil området være mer sårbart i forhold til redusert vannutskifling enn antatt av Sundfjord et al. (1999). På den annen side er det grunn til å forvente at oksygenforbruket vil bli mindre etter fjerning av det forurenkede sedimentlaget som vil inneholde mer oksygenforbrukende materiale enn eventuelle tildekkingsmasser og sedimentene under (Kowaczny, 1994).

Siktedypsobservasjonene viste at nedre grense for fotosyntesezonen ligger ned mot 6-7 meters dyp. Planterøst vil således kunne bidra til noe tilførsel av oksygen i løpet av sommeren. På den annen side vil oksygenforbruket i sedimentene under øke når algene dør og synker til bunns.

4.1. Beregning av vannutskifling ut fra de hydrografiske observasjonene.

Endringer i tetthetsstjiktningen i havnebassenget, som observert ved hjelp av T/S kjede og CTD sonde, vil forplante seg inn til områdene innenfor vollen og tunnelen ved horisontale strømmer. Hvis det løper seg opp med vann med lav saltinnholdighet i overflaten, vil tetthetsflatene flytte seg nedover med tiden, som f.eks. i Figur 11 fra 10. mai til 13. mai. Det vil da gå en strøm innover i overflaten, og ut gjennom kanalen på større dyp. Omvendt kan tyngre vann strømme inn i nedre del av tverrsnittet og gi en heving av tetthetsflatene, med strøm ut av området nærme overflaten. I figuren ses det for perioden 3. til 6. mai i dypintervallet.

Ut fra observasjonene med T/S kjeden og CTD sonde kan følgende slutes. CTD-observasjonene viser at vannutskiflingen skjer i gjennomsnitt ca. en gang pr. øke i sommerhalvåret, som er den årstiden som har dårligst vannutskifling. Dette skulle tilsvare følgende transporter i ulike dypintervaller for Bjørvika

$$0-4 \text{ m} \quad 0.5 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$4-6 \text{ m} \quad 0.3 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$6-8 \text{ m} \quad 0.2 \text{ m}^3/\text{s}$$

Pga. observasjonsfrekvensen på 1 gang pr. øke må dette betraktes som nedre grense for transporter. Resultatet for T/S-kjeden, som har bedre tidsoppløsning, viser mye raskere skiflinger, og gir høyere transporter. Vannutskiflingstiden varierer fra mindre enn ett døgn opp til 5-6 døgn i mai 1999. Gjennomsnittlige transport blir grovt beregnet:

$$0-4 \text{ m} \quad 2.2 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (varierende fra 1 til 0.8)}$$

4-6 m: 1,3 m³/s (varierende fra 2,5 til 0,4)

6-8 m: 1,2 m³/s (varierende fra 2,3 til 0,5)

Spørsmålet blir da om det nye tverrsnittsmålet kan bære slike transportar uten at strømmen blir kritisk og begrenser vannutskiftningen.

Begrensende arealer for transport av vann inn til Bjørvika under 4 meters dyp blir kanalen ved utstikkeren i øst. Det vannvolum som skal gjennom kanalen ved en full utskiftning under 4 m dyp er det samlede volumet av vann under dette dypet innenfor barrieren. Det samme gjelder for Bispevika.

Det samlede vannvolumet under 4 meter som trenges å skiftes ut utgjør nå for Bjørvika litt over 210 000 m³ (Tabell 1.). Kravet til en utskiftning på et par døgn i snitt gir en transport fra 4-8 meter inn i kanalen på i gjennomsnitt 1,3 m³/s. Tverrsnittsarealet på kanalen inn ved utstikkeren slik den er skissert i dag er ca. 30 m², hvilket betyr strømhastigheter på i størrelsesorden ca. 4 cm/s i siste fase av en innstrømming, når den kan skje i hele tverrsnittet. Økes kravet til å transportere maksimal observerte transport for disse dyp (dvs. 2,6 m³/s, utskiftning på 1 døgn) vil hastigheten øke til ca. 9 cm/s. Kravet til hastigheter blir innledet til større når innstrøm er å forvente på stigende vannstand (tidevann) begrenset til ca. 6 timer (0,5 cm/s). Slike strømhastigheter er neppe realistiske og transportkapasiteten i kanalen vil bli nærmere vurdert i kap. 4.2.

For Bispevika begrenses vannutskiftningen av den skisserte kanalen i øst. Vannvolumet under 2 meters dyp blir her ca. 160 000 m³. Med samme krav som for Bjørvika vil en utskiftning hvert annet døgn i snitt kreve en transport på ca. 0,9 m³/s. Med et tverrsnittsareal på 72 m² mellom 2 og 8 meters dyp vil dette bety en strømhastighet på 1 cm/s opp mot maksimalt 4 cm/s (krav til at alt vann skal inn på 6 timer). Innledet vil tunnelen ikke gi fjå innstrømming til dyp større enn 6 meter og effektivt gjennomstrømningsareal blir her redusert til 48 m², og strømhastigheten for å fylle hele indre del av Bispevika vil bli på 3 cm/s.

Beregningene forutsetter enveitstransport gjennom kanalene, og ser bare på transporten som gjennomsnitt over innstrømningsperioden og fordelt over hele tverrsnittet. For en innstrømming under en tetthetsflate som hever seg fra like over kanalbunnen og opp mot toppen av skipsstøtvolleer vil det derfor kunne bli høyere hastigheter i tidlige faser av innstrømmingen. Det avhenger av hvordan kanalvertsnitt og fyllingsvolum innenfor endrer seg med dyp. Beregningene i kap. 4.2 går mer i detalj inn på dette.

4.2. Transportkapasiteten i kanalene til Bjørvika og Bispevika

4.2.1. Innledning - forutsetninger for beregningene

Målingene våren og sommeren 1999 har vist at vertikale bevegelser av tetthetsflatene på tidsskala fra 1 døgn til 1 uke er et viktig trekk ved vannutvekslingen i området. For å unngå forverring av vannkvaliteten innenfor skipsstøtvolleer og tunnelen bør disse områdene kunne delta nok så nær fullt ut i slike endringer i tetthetsstruktur utenfor. For å oppnå det, må transportkapasiteten gjennom kanalene og over tunnelen bli så god at de horisontale transportene som er knyttet til heving og senking av tetthetsflater kan drivas gjennom kanalen uten horisontale tetthetsgradienter av betydning. Noen foreløpige enkle overslagsberegninger kan bidra til å belyse dette. Vi betrakter da strøm gjennom de skisserte kanalene og ser på utskiftningen av alt vann innenfor under ett. For både Bjørvika og Bispevika er det skissert en kanal inn på østsiden, som gir utveksling av både området mellom tunnel og skipsstøtvoll og området utenfor tunnelen. Forholdelsen over tunnelen er mye større enn kanalen, i begge de to områdene, og hele området innenfor kanalen betraktes da under ett.

Areal og volum som funksjon av dyp for de to områdene er vist i Tabell 1. I Bjørsvika finnes det dypeste området (-10 m dyp) mellom tunneltraséen og skipsstøtvolten på utsiden. Hvis disse partiene blir fylt opp til -8 m blir problemene med bunnavannet mindre, men det er uansett nok så små volumer. Det volumet som ligger under overkant av skipsstøtvolten og som må utveksles gjennom kanalen er altså i Bjørsvika ca. 210 000 m³ (under 4 m), mens det i Bispevika er ca. 160 000 m³ (under 2m).

Ved beregningene i dette kapitlet ses området innenfor kanalen under ett, og det tas altså ikke i betraktning at største dyp over tunnelen ligger 2-3 m høyere enn dypeste punkt innenfor. Det vil bety at utvekslingen av bunnavannet med tetthetsendringer vil skje noe raskere enn beregnet på utsiden, og litt ekstra forsøket på innsiden av tunnelen, men det får antagelig sekundær betydning for det totale bildet.

Vi tenker oss forenklet en situasjon med to homogene vannlag, med relativt liten tetthetsforskjell. I utgangspunktet ligger grenseflaten mellom de to lagene i underkant av kanaldypet på utsiden, og med hele bassenget innenfor fylt av vann fra det øverste, letteste laget. Dette er selvsagt sterkt forenklet, men det bør representere situasjoner med svingninger i et veldefinert springspunkt ganske godt, og iallfall vise grovt hvor stor forankelse og demping støtvollene kan forårsake.

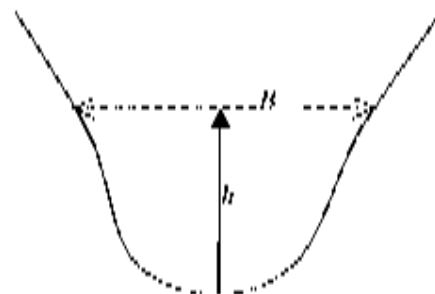
Det antas nå at overflatelaget i løpet av et døgn drives sørover ut av havnebassenget pga. vind påvirkning, slik at vann fra det litt tyngre underliggende laget bringes opp til i overkant av skipsstøtvolten. Vi ser på hvert av de to områdene for seg. Hvis bassenget innenfor skal følge med i dette, må det gå en innstrøm gjennom kanalen. Transporten ut av bassenget vil skje over hele det store tverrsnittet ovenfor toppen av skipsstøtvolten, og medfører svært små hastigheter og tilsvarende små trykkgradienter. Den vesentlige begrensningen blir transportkapasiteten gjennom kanalen. Det som driver vann gjennom kanalen vil være forskjell i tetthetsgjennomsnitt innenfor og utenfor. Hvis grenseflaten mellom lagene heves på utsiden blir det et lite overtrykk i det nedre laget på utsiden, som driver vann inn gjennom kanalen. Omvendt vil en senkning på utsiden gi en trykkgradient ut gjennom kanalen.

4.2.2. Modell for trykkdrevet transport

For å se hvordan transportkapasiteten innvirker på bevegelsen av tetthetsflatene opp og ned setter det opp en enkel modell, som anvendes på et scenario med både heving og senking av tetthetsflaten på utsiden. Vi antar at kanalen har varierende bredde $B(z)$ med høyde z over største dyp i kanalen som i illustrasjonen til høyre, dvs. at strømningsarealet A under høyde h er

$$A(h) = \int_0^h B(z) dz$$

Det nederste laget står opp til høyde h_1 på utsiden og h_2 på innsiden. Hvis $h_1 > h_2$ vil vannet drives inn gjennom åpningen av trykkgradienten pga. høydeforskjellen. Ved små forskjeller mellom h_1 og h_2 vil hastigheten være gitt direkte av trykkgradienten. Hvis h_2 er under en viss grense vil det gå såkalt kritisk strøm gjennom kanalen, og da vil høyden i det begrensende tverrsnittet stille seg inn slik at transporten blir størst mulig for gitt høyde h_1 .



Generelt vil hastigheten gå ut fra trykkforskjellen i et tverrsnitt hvor grenseflaten står i høyde h_1 være:

$$v = \sqrt{2g \frac{\Delta \rho}{\rho} (h_1 - h_2)}$$

Transporten gjennom arealet $A(h_c)$ blir

$$Q = v(h_c) \cdot A(h_c)$$

Kritisk (begrensende) strømtverrsnitt for gitt høyde h_1 har pr. definisjon en høyde h_c , slik at Q blir størst mulig, det vil si slik at

$$\frac{dQ}{dh_c} = 0$$

Imottatt uttrykket for v (og forutsatt $h_1 > h_c$) gir det en generell betingelse som kan løses ut for h_c :

$$2(h_1 - h_c)B(h_c) = A(h_c)$$

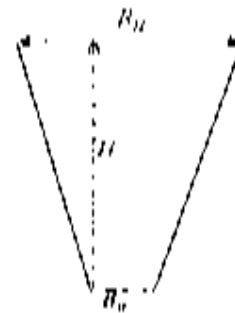
For de skisserte kanalene, med trapesformet tverrsnittsareal med bredde B_0 i bunn, og bredde B_H ved høyde H , gjelder:

$$A(h_c) = \left(B_0 + \frac{1}{2} s h_c \right) h_c$$

$$B(h_c) = B_0 + s h_c$$

hvor

$$s = \frac{B_H - B_0}{H}$$



Når disse uttrykkene innsettes i betingelsen for kritisk strøm, fås

$$2(h_1 - h_c)(B_0 + s h_c) = \left(B_0 + \frac{1}{2} s h_c \right) h_c$$

som etter litt omorganisering kan skrives slik:

$$5s h_c^2 + 2(3B_0 - 2s h_1) h_c - 4B_0 h_1 = 0$$

Løsningen av denne ligningen gir kritisk høyde $h_{c,1}$. Hvis $s = 0$ (rektangulært tverrsnitt) gjelder løsningen $h_{c,1} = 2h_1/3$, og hvis $B_0 = 0$ (triangel-tverrsnitt) $h_{c,1} = 4h_1/5$. Generelt for trapesformet tverrsnitt med $s > 0$, $B_0 > 0$ fås løsningen¹:

$$h_{c,1} = \frac{2}{5} h_1 - \frac{3 B_0}{5 s} + \frac{1}{5} \sqrt{\left(3 \frac{B_0}{s} - 2 h_1 \right)^2 + 5 \cdot 4 \frac{B_0}{s} h_1}$$

Akkumulert volum på innsiden vil følge ligningen:

$$\frac{dVol}{dt} = Q$$

Så lenge $h < h_{c,1}$ vil det gå kritisk strøm bestemt av h_c , mens det ellers er forskjellen mellom h_1 og h_c som bestemmer strømmen. Vi kan altså:

$$Q = \int_{z_0}^{z_1} 2g \frac{\Lambda''}{\rho} (h_1 - h_c) \cdot \left(B_0 + \frac{1}{2} s \cdot h_c \right) h_c \quad \text{hvor} \quad h_c = \max(h_{c,1}, h_1)$$

Overflatearealet på innsiden antas å øke trossvis lineært med høyde z over maksimalt dyp

$$F_1(z) = F_{1,0} + (F_{1,max} - F_{1,0}) \frac{z - z_{1,0}}{z_1 - z_{1,0}} \quad \text{for} \quad z_1 - z > z_{1,0} \quad \text{med} \quad F_{1,0} = 0 \quad \text{for} \quad z_0 = \text{maksimalt dyp}$$

Samlet volum under høyde z er da:

¹ Bare den ene løsningen er fysisk realistisk, dvs. når $h_{c,1} > 0$.

$$Vol_t(z) = Vol_{z,0} + F_{z,0} (z - z_0) + \frac{F_{z,0} - F_{z,1}}{2(z_{z,0} - z_0)} (z - z_0)^2$$

hvor

$$Vol_{z,0} = Vol_{z,1} + \frac{(F_{z,0} + F_{z,1})(z_0 - z_1)}{2} \quad \text{med startverdi } Vol_{z,0} = 0$$

Høyden $h_t = z$ kan da beregnes for gitt volum innenfor grensene $[Vol_{z,0}; Vol_{z,1}]$ ved å løse ligningen ovenfor mlp. \approx

$$\text{Hvis } F_{z,0} \neq F_{z,1} \quad h_t = z_0 + (z_{z,0} - z_0) \sqrt{\frac{F_{z,0} + \sqrt{F_{z,0}^2 + 2 \frac{F_{z,0} - F_{z,1}}{z_{z,0} - z_0} (Vol_t - Vol_{z,0})}}{F_{z,0} + F_{z,1}}}$$

$$\text{Hvis } F_{z,0} = F_{z,1} \quad h_t = z_0 + \frac{(Vol_t - Vol_{z,0})}{F_{z,0}}$$

Førløpet ved en innstrømming av tyngre vann beregnes da ved å spesifisere et tidsforløp med økende høyde $h_t(t)$ på utsiden. I regne-eksemplene i neste avsnitt er det antatt en konstant økning over en viss tidsperiode og deretter konstant beliggenhet, dvs

$$h_t(t) = H_1 \min(t, T)$$

hvor H_1 er endelig beliggenhet av grenseflaten og T er den tiden vannet tar på å stige opp til denne høyden.

Transporten Q (volum pr. tidsenhet) inn gjennom kanalversnittet beregnes som funksjon av høyden h_t og integreres til akkumulert volum som funksjon av tid. Beregningen skjer i mange små tidskritt, og volumet ved hvert tidspunkt brukes til å beregne beliggenheten av grenseflaten på innsiden, og der ved hva som blir transporten i neste tidskritt. Resultatet blir en økende h_t i tid men med forsinkelse i forhold til h_t .

For utstrømming brukes den samme modellen, men med h_t spesifisert til å reduseres over et visst tidrom, og med h_1 og h_t byttet om i beregningen av h_t og Q . Strømmen går nå ut, slik at differensialligningen blir:

$$\frac{dVol_t}{dt} = -Q$$

med startverdi for $t = 0$ tilsvarende $h_t = h_1$. Resultatet blir en synkende h_t , men forsinket i forhold til h_t .

4.2.3. Resultater

Det er gjort slike beregninger for begge de to innstengte områdene, med topografi og kanalutforming som beskrevet i kap. 2. Det er gjort beregninger for forholdsvis små tetthetsforskjeller mellom øverste og nederste lag: 1,2 og 3 sigma-enheter. Tidsskuttet for heving eller senking av grenseflaten på utsiden er variert mellom 1 og 3 døgn.

Figur 12 og 13 nedenfor oppsummerer resultatet. De viser hvordan tetthetsflaten innenfor varierer med tid når den utenfor hever seg (figurer til venstre) eller senker seg (figurer til høyre). Hvert figurpar viser forløpet for tre ulike tetthetsforskjeller (1,2 eller 3 sigma-enheter) for en bestemt kombinasjon av område (Bjørvika eller Hisøevika) og tidsrom for høyde- endring på utsiden (1,2 eller 3 døgn). Endring i vannstand på utsiden er vist med tykk strek (punkt linje).

For Bjørvika får forsinkelser fra 1/2 til 1 døgn for en stor heving av vannstanden over 1 til 3 dager, avhengig av hvor stor tetthetsforskjell en regner med og hvor rask hevingen skjer. Ved rask senking

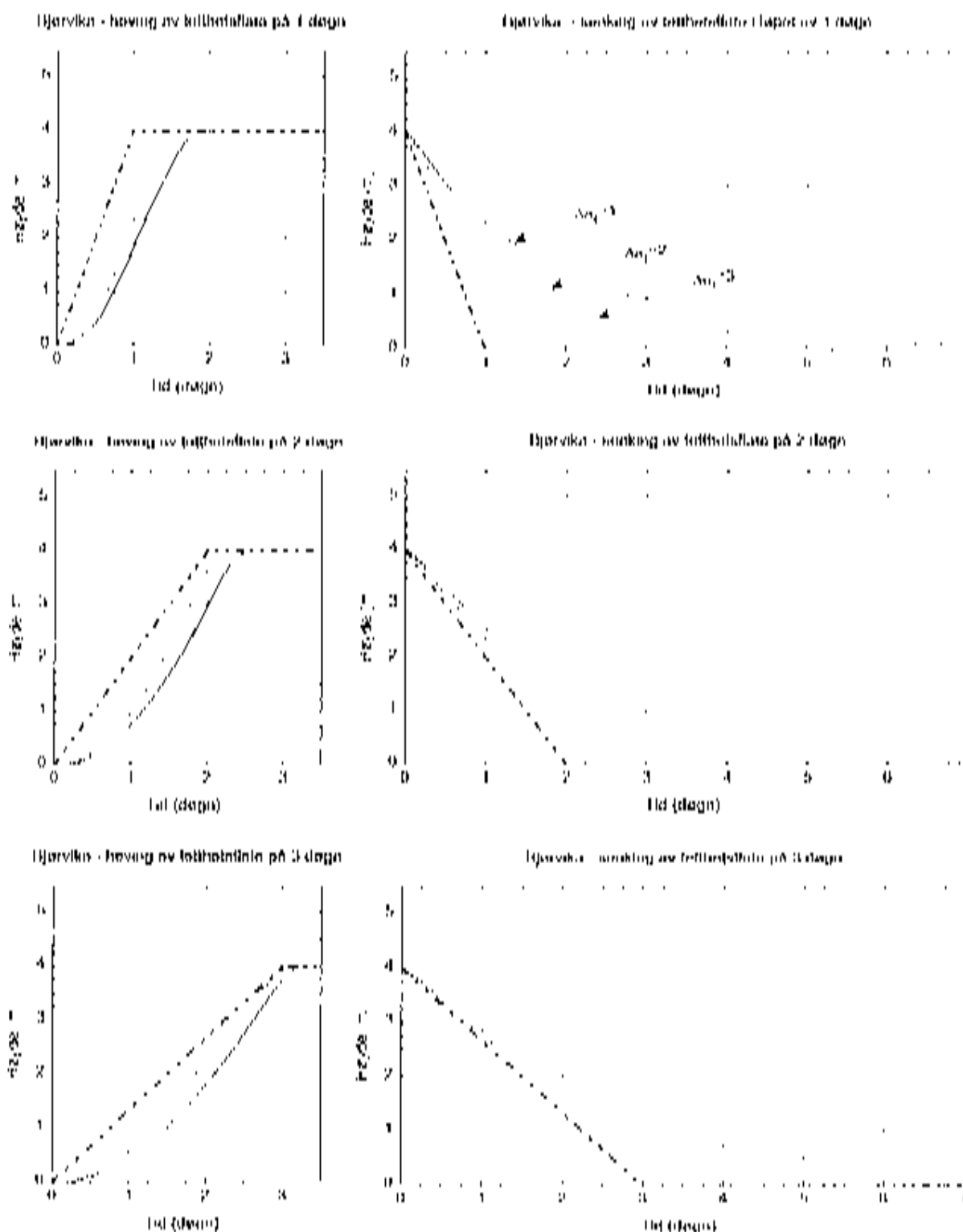
av tetthetsflatene utenfor er det en betydelig forsinkelse på innsiden. For en senking fra 4 til 8 meters dyp på ett døgn på utsiden vil det ta 2-4 ganger lenger tid å tomme Bjørvika ned til 7 m dyp (høyde 1 m) i forhold til dagens situasjon med åpen forbindelse i full bredde. Responsen varierer relativt lite med hvor raskt tetthetsflaten synker på utsiden, men er selvsagt avhengig hvor sterk tetthetsgjiktningen er. Alt i alt innebærer dette at for de korteste episodene i datamaterialet fra sommeren 1999 (1-2 dager) kan det bli en markert demping i responsen på innsiden. For lengre perioder (3-6 dager) vil den nederste meteren over kanalbunnen (dvs. fra -7 til -8 meter) få redusert utveksling. Forsinkelsen med demping av responsen gjelder først og fremst de tilfellene hvor dominerende tetthetsflate beveget seg i området 6-8 m dyp, altså like over kanalbunnen. Variasjonen mellom 4 og 6 m dyp vil bli mindre dempet. I beregningene er det ikke tatt hensyn til at tunnelen bare går ned til -7 m, slik at det i realiteten bare er en terskel m. 2 inn til vannet mellom 7 og 10 m dyp på innsiden. Det innebærer at responsen under 7 m dyp (1 m høyde) blir usikkert enn beregnet på utsiden av tunnelen, mens det umiddelbart tunnelen vil bli tilføyere respons under -7 m enn beregnet her.

Et mulig tiltak for å bedre vannutskiftningen ned mot bunnen i Bjørvika kan være å legge inn rør gjennom vollen nede ved bunnen for å øke strømningsnivået der nede. Det er gjort supplerende beregninger av tilsvarende scenarier som i Figur 12 når kanalen suppleres med rør med samlet tverrsnittsareal 6 m^2 fra 8 og 7 m dyp (eksempelvis 5-6 rør med 1,2 m diameter). Resultatene viser at det da blir en mye raskere respons. Ved heving av tetthetsflaten på ett døgn med en tetthetsforskjell på 1 sigma, enhet (heltrukken kurve øverst til venstre i Figur 12) vil forsinkelsen bli omtrent halvert, og for senking av tetthetsflaten (heltrukken kurve øverst til høyre i Figur 12) vil høyden på innsiden være nede i 0,5 meter etter 2 døgn, i stedet for 1,5 meter som på figuren. De andre resultatene vil bli tilsvarende endret.

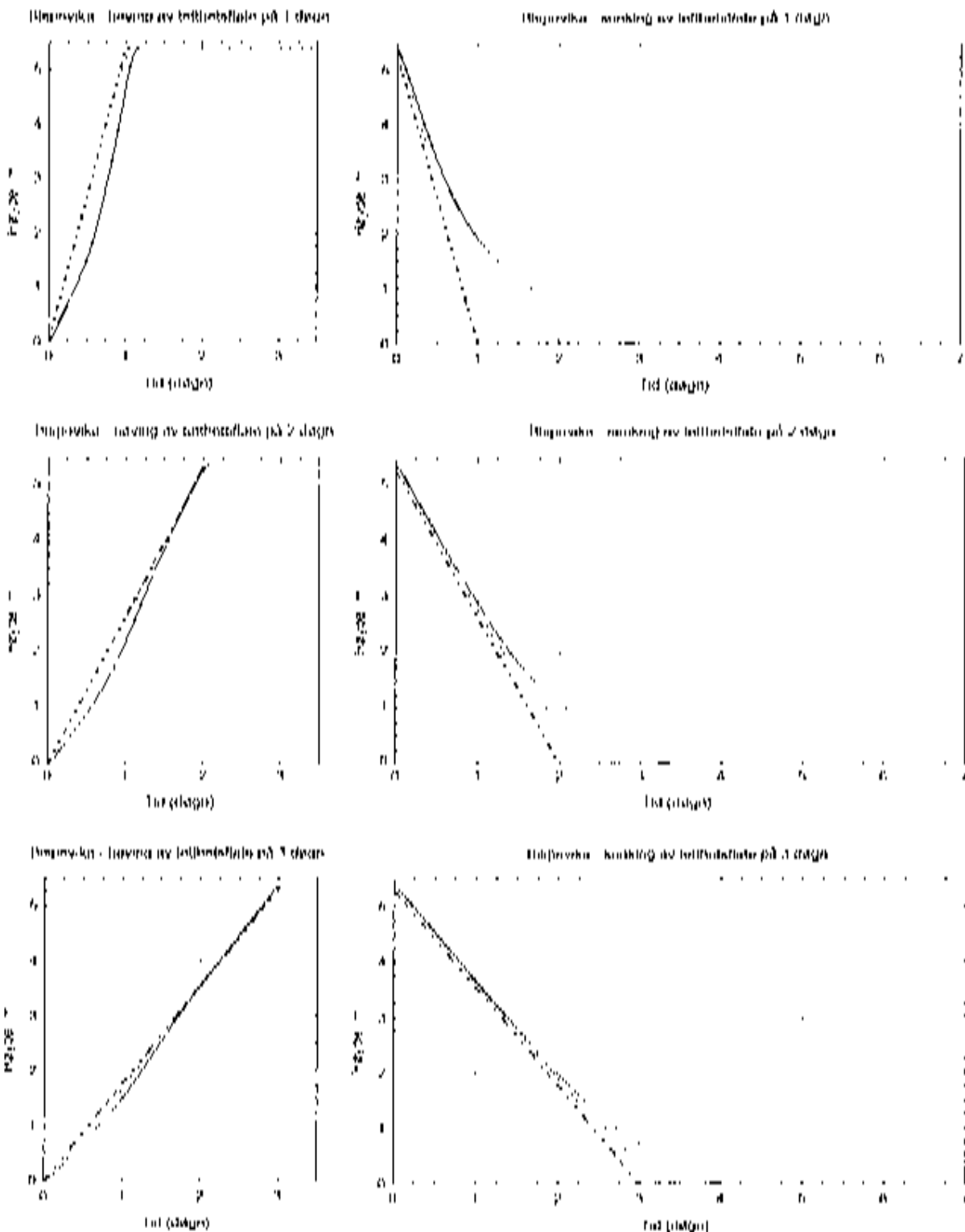
For Bispevika vil forholdet mellom volum og strømningsnivå være gunstigere enn i Bjørvika, spesielt under 6 m dyp (se Tabell 1), og det er bare mindre forsinkelser på noen få timer ved heving av tetthetsflatene. Ved utstrømning er det en tydelig forsinkelse siste fase av senking av tetthetsflaten ned mot kanalbunnen når senkingen skjer i løpet av ett døgn, mens det for episoder av 2-3 døgns varighet ikke er særlig forsinkelse ned til 80 % av kanalhøyden, altså når grenseflaten står 1 m over kanalbunnen på innsiden. Det er også relativt beskjeden forsinkelse ved senking forbi den siste meteren over kanalbunnen. Her bør vannutskiftningen derfor bli ganske god med en kanal som skissert.

For begge områdene vil det kunne oppstå hastighets- på opp mot 15-20 cm/s gjennom kanalen under inn- og utstrømningsfasene. Det ligger en del over det som ble beregnet forut, dels pga. at det under en innstrømning vil være en forsinkelse som er størst i starten og som tas igjen mot slutten av innstrømningen, og delvis fordi det meste av innstrømningen i de modellerte scenarier vil skje fordelt bare over en del av tverrsnittet.

Det er her ikke tatt hensyn til friksjon, som vil kunne minske transportene noe, men til gjengjeld gi bidrag til vertikalblanding. Friksjonen i selve kanalstrømmen er antagelig nepplisjerbar, men det vil være avhengig av den hydrauliske raketten i kanalveggen, om blir større om den bare består av sprengsteinsflater enn om det stipes betongvegger. Den kinetiske energien som utløses ved innstrømning gjennom kanalene vil bli dissipert i hvirvler og turbulens på innsiden og kan gi noe vertikal blanding der. Imidlertid ligger de dypeste områdene i Bjørvika langt under kanalen, så det er ikke sikkert det vil ha noen betydning for lufting av de dypeste områdene.



Figur 12. Modellregning av respons i Bjørsvika ved heving og senking av tetthetsflaten mellom to homogene lag på utsiden over 1, 2 og 3 dager. Til venstre vises forløp ved heving av tetthetsflaten, og til høyre når tetthetsflaten senker seg. Vertikal akse er høyde i meter over bunnen av kinnelen, som vi antar å gå fra -8 til -4 meter. Hver figur viser kurver for tre ulike tetthetsforskjeller (se delfigur øverst til venstre).



Figur 13. Modellberegning av respons i Dispevika ved heving og senking av tetthetsflaten mellom to homogene lag på utsiden over 1, 2 og 3 døgn. Til venstre vises forløp ved heving av tetthetsflaten, og til høyre når tetthetsflaten senker seg. Vertikal akse er høyde i meter over bunnen av kanalen, som er antatt å gå fra -7,4 til -2 m dyp. I hver delfigur vises kurver for tre ulike tetthetsforskjeller (se delfigur øverst til venstre i Figur 12).

5. Konklusjoner.

5.1. Bjorvika.

For å sikre at vannutskiflingen og dermed vannkvaliteten ikke blir dårligere i Bjorvika enn i dag, må transporten i det minste vedlikeholdes på dagens nivå. Dette forutsetter at transportkapasiteten må være omtrent like stor som dagens. Transportkapasiteten begrenses når tverrsnittsarealet blir så lite at åpningen ikke kan transportere tilstrekkelig store mengder vann ved små trykkforskjeller, dvs. strømshastigheten på vannet blir kritisk og variasjonene på innsiden deropet i forhold til på utsiden.

Mellom overflaten og 4 meters dyp er det liten arealføringsforandring og en forventer ikke noen forandring i vanntransporten ut/inn i Bjorvika.

Mellom 4 meters dyp og bunns blir transportkapasiteten i kanalen ved Ulstrøketen øst i Bjorvika avgjørende for forholdene innenfor både barrieren og tunnelen. Beregningene viser at kanalen kan transportere tilstrekkelig med vann inn i Bjorvika for dypinnsstrømmingsepisoder som tar 3 døgn eller mer. For enkere innstrømmingsepisoder, dvs. hvis tetthetsflatene heves i løpet av 1-2 dager, og svinger raskt tilbake (innenfor ett døgn), vil svingningen, og dermed innstrømmen av vann bli merkbart dempet. Det som vil begrense vannutskiflingen mest er antagelig dypinnsstrømmingsepisodene, dvs. når tetthetsflatene senkes, slik at dypvannet strømmer ut av kanalen. Dette er selvsagt et vesentlig element i den totale vannutskiflingen, som fremkommer ved varierende innstrøm og utstrøm. Senkningen av tetthetsflatene vil bli vesentlig dempet, spesielt for vann under 6 m dyp, hvis eringen må være flere dager for å gi fullt eller nest full respons innenfor. For episoder med hurtigere vannutskifling vil transportkapasiteten altså ikke være tilstrekkelig. Demping i dypinnsstrømming vil i sin tur gi lavere innstrømming når tetthetsflatene igjen heves på utsiden, og resultatet blir en vesentlig demping av den vannvekslingen som er knyttet til raske vekslinger. En utskiflingsfrekvens på ca. 1 uke ut fra innstrøm/utstrøm kan likevel fortsatt være realistisk, men det vil til en viss grad være det samme vannet som strømmer frem og tilbake, og en vil altså ikke få full effekt i form av oksygenforying. En økning av effektivt strømningsstverrsnitt i nedre del vil hjelpe mye, f.eks. dersom det kunne legges inn noen rør gjennom nedre del av vollen med til sammen 6 m² tverrsnitt. Beregninger tyder på at det vil kunne gi akseptable forhold ved naturlig vannutskifling.

De to avlukkede områdene (D og A) i Bjorvika vil kunne løses som anbefalt tidligere (Sandfjord et al., 1999), dvs. med rørsystemer til område D, med 2 rør med diameter 55 cm eller 4 rør med diameter 48 cm. En kombinert løsning med delvis gjenfylling og rørforbindelse til området innenfor barrieren og havnebassenget bør vurderes.

Område A er ekstra vanskelig å vurdere. Med samme krav til vannforying som i det øvrige bassenget (ca. 1 gang pr 2 døgn), vil et innstrømningsareal på ca. 10 m² bli nødvendig, konstruert som flere rør i ulike dyp. Alternativ til dette er pumping av vann fra A til havnebassenget. Det bør også vurderes å fylle opp området helt eller delvis.

5.2. Bispevika.

De samme forutsetninger vil i prinsippet gjelde for Bispevika som for Bjorvika, men situasjonen blir litt annerledes pga. annen topografi. For Bispevika vil vannutskiflingen fra overflaten til 2 meters dyp

ikke bli nevnevendig forandret fra dagens situasjon. Med en kanal som skissert på øst siden inn til området mellom barrieren og tunnelen vil området innvendig få tilstrekkelig vannutskiftning. Svungningene i tetthetsdeltene vil forplante seg nok så utløst inn i Hjørsvika, og bare de aller verste svungningene vil bli dempet av vannhevingene ved kanalen.

5.3. Generelt.

De gjennomførte beregningene har fortsatt store usikkerheter og det anbefales derfor å gjøre visse forberedelser til forbedringsstrak av vannutskiftningen som kan bli aktuelle hvis de skisserte kanalene ikke skulle være tilstrekkelige. I begge bassengene kan det bli nødvendig å bruke diffusor for å tilføre ferskvann fra Akerselva til bassenget for å forbedre vannutskiftningen (Se Sundtjord et al., 1999, Berge og Mølver, 1994). For å forberede dette bør det legges inn nødvendige rørforbindelser når anlegget bygges, slik at pumping kan iverksettes senere dersom det viser seg å være behov for det. Dette gjelder først og fremst Hjørsvika, men det kan ikke utelukkes at det også blir nødvendig med noe nedpumping i Hjørsvika.

6. Forslag til videre oppfølging

For å kunne gi siktere råd for anlegget virkeligjøres, og kunne følge med eventuelle effekter av tunnelanlegget når det er ferdig, bør det opprettes et overvåkingsprogram som det slik at en kan få en statistisk sett tilstrekkelig dokumentasjon av forholdene før byggearbeidene starter. Denne overvåkningen bør starte i år 2000. Hensikten er å sikre seg bedre kjennskap til området enn en har i dag, og dermed gi grunnlag for å kunne bestemme eventuelle forandringer i miljøet når tunnelen og barrierene er på plass. Et slikt måleprogram vil omfatte observasjoner av siktedypp, sjiktning, oksygen samt måling av strom over en langre periode. Oksygen må måles med presisjonsanalyse (Winkler) og ikke bare med sonder.

7. Referanser

- Berge, J.A. og Molvær, J. 1991: Miljøvurdering av tre utbyggingalternativer for E 18 over Hisøevika og Hjørveka. Rapport Nr. 3043, NIVA, Oslo, 208.
- Hauge, A., og M.Schaanning, 1999. Forurenset sediment og vannkvalitet. Forslag til løsninger. NCE, Teknisk notat 99016, 30.06.99, , 19s + vedlegg.
- Konieczny, R., 1991: Miljøgifterundersøkelser i indre Oslofjord. Delrapport I, Miljøgifter i sedimenter. Norsk institutt for vannforskning. Rapport nr. 3091.
- Magnusson, J., Tomslund, E.R. og Johnsen, T., 1996. Overvåking av lammesmuttsituasjonen i indre Oslofjord 1995. Statlig program for forurensningsovervåking. Rapport nr. 661/96. NIVA-rapport Lnr. M87/96.
- Molvær, J., J.Knutzen, J.Magnusson, B.Rygg, J.Skei og J.Sørensen, 1997. Klassifisering av miljøkvalitet i fjorder og kystvann. SFT Veiledning 97:03, TA 146/1997, Moss.
- Stundjord, A., B.Hjerkeng og M. Schaanning, 1999: Tunnelledet og mulige konsekvenser for vannutskifling og vannkvalitet. NIVA-notat innarbeidet i: Hauge, A., og M.Schaanning, 1999. Forurenset sediment og vannkvalitet. Forslag til løsninger. NCE, Teknisk notat 99016, 30.06.99, , 19s + vedlegg.